

Министерство образования и науки Российской Федерации
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

С.А. Перепелица, Н.В. Богач

СИСТЕМЫ И СЕТИ СВЯЗИ
Методическое руководство к лабораторным работам

Санкт-Петербург
2011

УДК 621.391.26(075)
ББК 32.811.3я7
Т 41

| | |
|--|----|
| Вводная часть..... | 4 |
| Лабораторная работа №1 «Визуализация сигналов во временной и частотной области»..... | 5 |
| Лабораторная работа №2 «Спектры простых сигналов»..... | 7 |
| Лабораторная работа №3 «Линейная фильтрация» | 11 |
| Основная часть | 13 |
| Лабораторная работа №4 «Амплитудная модуляция» | 13 |
| Лабораторная работа №5 «Угловая модуляция»..... | 17 |
| Лабораторная работа №6 «Цифровая модуляция»..... | 23 |
| Лабораторная работа №7 «Помехоустойчивое кодирование»..... | 24 |

Вводная часть

Вводная часть представляет собой три лабораторных работы, которые знакомят студентов с основными средствами моделирования систем связи в средах MatLab и Simulink. Для ускорения процесса овладения приемами работы в этих средах студентам предлагаются образцы кода и прототипы моделей. По каждой лабораторной работе оформляется отчет. Отчеты по выполненным работам должны включать в себя следующие пункты:

1. Название работы
2. Цель работы: работы
3. Постановка задачи
4. Теоретическое обоснование, содержащие основные соотношения между наблюдаемыми в работе явлениями
5. Ход работы
6. Выводы, основанные на пп. 3,4

Примечание: Рисунки в тексте отчета должны быть пронумерованы и иметь названия. В тексте описания хода работы на рисунки должны быть сделаны ссылки.

Пример:

Рассмотрим сигнал $y=\cos x$ и его спектр, полученный с помощью функции $\text{fft}(y)$ (Рис. 1).

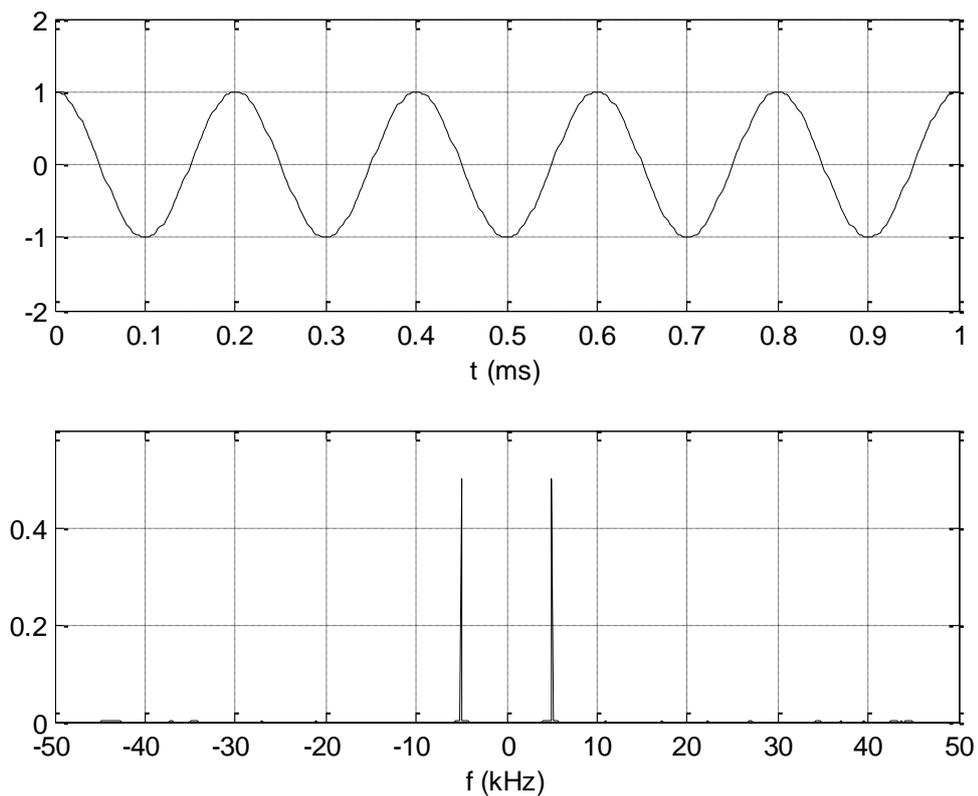


Рис. 1 Сигнал $y=\cos x$ и его спектр

Лабораторная работа №1 «Визуализация сигналов во временной и частотной области»

Цель работы:

Познакомиться со средствами генерации сигналов и визуализации их спектров.

Постановка задачи

В командном окне MATLAB и в среде Simulink промоделировать чистый синусоидальный сигнал, а также синусоидальный сигнал с шумом. Получить их спектры.

Примерный ход работы

1. Чистый синусоидальный сигнал и его спектр в командном окне MATLAB

```
x = 0:0.01:4*pi;
f0 = 5;
%исходный сигнал
y = sin(2*pi*f0*x);
plot(x(1:200),y(1:200))
grid
%спектр исходного сигнала
figure
s = fft(y,512);
ss = s.*conj(s)/512;
f=100*(0:255)/512;
plot(f,ss(1:256))
axis([0 max(f) 0 10])
grid
```

2. Синусоидальный сигнал с шумом в командном окне MATLAB

```
x = 0:0.01:4*pi;
f0 = 5;
%исходный сигнал с шумом
y = sin(2*pi*f0*x);
noise=rand(size(x));
y1=y+0.3*noise;
plot(x(1:200),y1(1:200))
grid
%спектр исходного сигнала с шумом
figure
s1 = fft(y1,512);
ss1 = s1.*conj(s1)/512;
plot(f,ss1(1:256))
axis([0 max(f) 0 10])
grid
```

3. Чистый синусоидальный сигнал и его спектр в среде Simulink

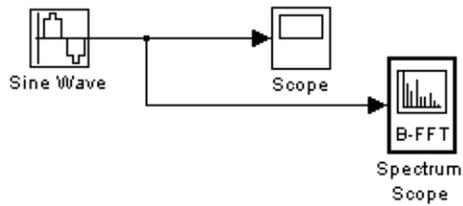


рис.1. Схема simulink для визуализации исходного сигнала и его спектра

4. Синусоидальный сигнал с шумом в среде Simulink

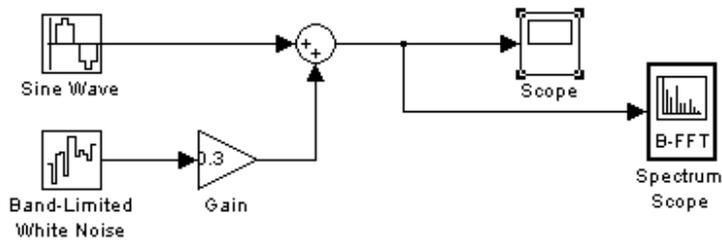


рис.2. Схема simulink для визуализации исходного сигнала с шумом и его спектра

Вывод

Пояснить возможные расхождения между теоретически ожидаемым и полученным спектром сигнала вследствие дискретности представления сигналов, а также их конечности во времени

Лабораторная работа №2 «Спектры простых сигналов»

Цель работы:

Получить представление о тестовых сигналах во временной и частотной областях.
Реализовать операцию свертки сигналов.

Постановка задачи

В командном окне MATLAB и в среде Simulink промоделировать следующие тестовые сигналы:

полигармонический сигнал

$$y = \sin x + \sin 3x$$

$$y = \sin x + \cos x$$

$$y = \sin x + 3\sin 3x + 5\sin 5x$$

треугольный сигнал

меандр

треугольный сигнал путем свертки двух меандров.

Получить их спектры.

Ход работы

1. Полигармонический сигнал и его спектр в командном окне MATLAB

```
%полигармонические сигналы
x = 0:0.01:4*pi;
f=100*(0:255)/512;
%сигнал y=sin(x)+sin(3x)
figure
y1 = sin(2*pi*x)+sin(2*pi*3*x);
plot(x(1:200),y1(1:200))
grid
%спектр сигнала y=sin(x)+sin(3x)
figure
s1 = fft(y1,512);
ss1 = s1.*conj(s1)/512;
plot(f,ss1(1:256))
grid
%сигнал y=sin(x)+cos(x)
figure
y2 = sin(2*pi*x)+cos(2*pi*x);
plot(x(1:200),y2(1:200))
grid
%спектр сигнала y=sin(x)+cos(x)
figure
s2 = fft(y2,512);
ss2 = s2.*conj(s2)/512;
plot(f,ss2(1:256))
grid
%сигнал y=sin(x)+3sin(3x)+5sin(5x)
figure
y3 = sin(2*pi*x)+3*sin(2*pi*3*x)+5*sin(2*pi*5*x);
plot(x(1:200),y3(1:200))
```

```

grid
%спектр сигнала y=sin(x)+cos(x)
figure
s3 = fft(y3,512);
ss3 = s3.*conj(s3)/512;
plot(f,ss3(1:256))
grid

```

2. Треугольный сигнал и его спектр в командном окне MATLAB

```

%треугольный сигнал
x = 0:0.01:4*pi;
f=100*(0:255)/512;
%сигнал
figure
y = abs(x-ceil(x)+0.5);
plot(x(1:200),y(1:200))
grid
%спектр
figure
s = fft(y,512);
ss = s.*conj(s)/512;
plot(f,ss(1:256))
axis([-1 max(f) 0 10])
grid

```

3. Меандр и его спектр в командном окне MATLAB

```

%меандр
figure
y=[ones(1,100) zeros(1,100)];
plot(y)
grid
%спектр
figure
s = fft(y,512);
ss = s.*conj(s)/512;
plot(ss(1:256))
grid

```

4. Треугольный сигнал, полученный из меандра и его спектр в командном окне MATLAB

```

%треугольный сигнал путем свертки меандров
figure
yy=[ones(1,100) zeros(1,100)]; %меандр
y = conv(yy,yy);
plot(y)
grid
%спектр
figure
s = fft(y,512);
ss = s.*conj(s)/512;

```

```
plot(ss)
axis([0 300 0 50])
grid
```

5. Полигармонический сигнал и его спектр в среде Simulink

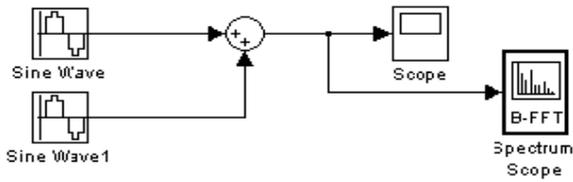


рис.1. Схема simulink для визуализации сигнала $y = \sin x + \sin 3x$ и его спектра

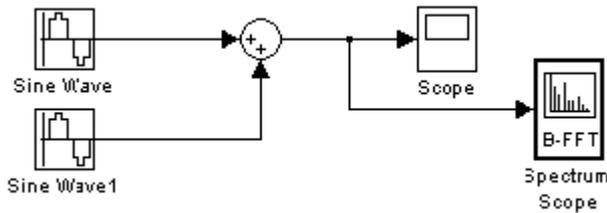


рис.2. Схема simulink для визуализации сигнала $y = \sin x + \cos x$ и его спектра

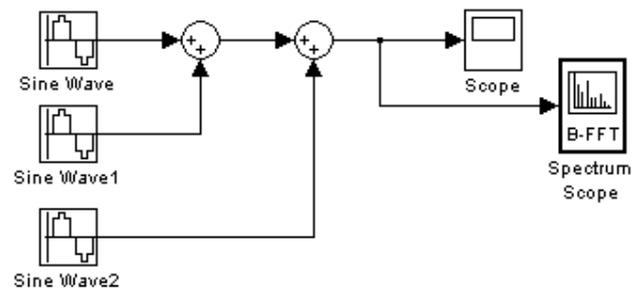


рис.3. Схема simulink для визуализации сигнала $y = \sin x + 3\sin 3x + 5\sin 5x$ и его спектра

6. Треугольный сигнал и его спектр в среде Simulink

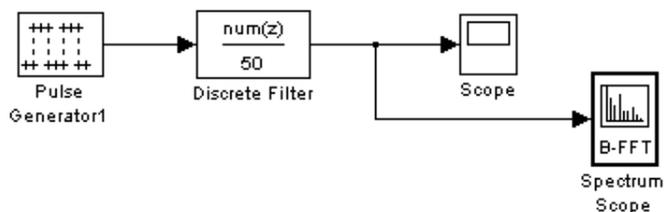


рис.4. Схема simulink для визуализации треугольного сигнала и его спектра

7. Меандр и его спектр в среде Simulink

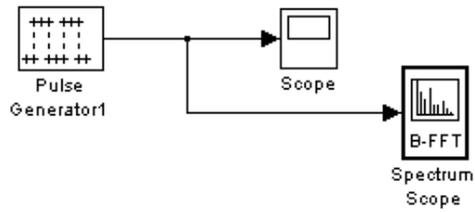


рис.5 Схема simulink для визуализации меандра и его спектра

8. Треугольный сигнал, полученный из меандра и его спектр в среде Simulink

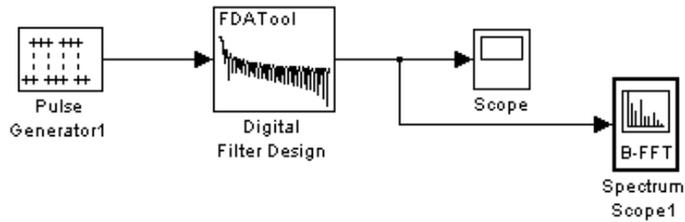


рис.6 Схема simulink для визуализации треугольного сигнала, полученного из меандра, и его спектра

Вывод

Обосновать математически использование фильтра с прямоугольным окном для получения треугольного сигнала

Лабораторная работа №3 «Линейная фильтрация»

Цель работы:

Изучить воздействие ФНЧ на тестовый сигнал.

Постановка задачи

Сгенерировать гармонический сигнал с шумом и синтезировать ФНЧ. Получить сигнал во временной и частотной областях до и после фильтрации. Сделать выводы о воздействии ФНЧ на спектр сигнала.

Примерный ход работы

1. Выполнение задачи в командном окне MATLAB

Смоделируем низкочастотный гармонический сигнал $y = \sin(2\pi f t)$, частота сигнала 1 Гц). Частоту дискретизации установим равной 100 Гц. Будем использовать встроенную функцию BUTTER, синтезирующую ФНЧ Баттерворта. В нашей работе будем использовать фильтр 16 порядка и нормализованную относительно частоты Найквиста частоту среза равную 0.98 (частота Найквиста равна половине частоты дискретизации, т.е. $100\text{Гц}/2 = 50\text{Гц}$, тогда нормализованная частота среза равна $1 - (1\text{Гц}/50\text{Гц}) = 0.98$).

Построим сигнал и его спектр до и после фильтрации. Ниже приведен код программы:

```
x = 0:0.01:4*pi;
f=100*(0:255)/512;
%исходный сигнал с шумом
figure
noise=rand(size(x));
yy = sin(2*pi*x); %гармонический сигнал
y = yy+0.3*noise; %шум
plot(x(1:200),y(1:200))
grid
%моделирование ФНЧ
[B,A] = BUTTER(16,0.98);
B=B./sum(B);
A=A./sum(A);
%обработка сигнала ФНЧ
figure
y2 = conv(y,[B,A]);
plot(x(1:200),y2(1:200))
grid
%спектр исходного сигнала с шумом
figure
s = fft(y,512);
ss = s.*conj(s)/512;
plot(f,ss(1:256))
axis([0 max(f) 0 2])
grid
%спектр отфильтрованного сигнала
figure
s2 = fft(y2,512);
```

```

ss2 = s2.*conj(s2)/512;
plot(f,ss2(1:256))
axis([0 max(f) 0 2])
grid

```

2. Выполнение задачи в среде Simulink

Аналогично п.1, смоделируем гармонический сигнал с шумом. Для синтеза ФНЧ будем использовать стандартный блок Digital Filter Design.

Построим сигнал и его спектр до и после фильтрации (рис.2.2, рис.2.3, рис.2.4, рис.2.5.).

Схема simulink для выполнения задачи изображена на рис.1.

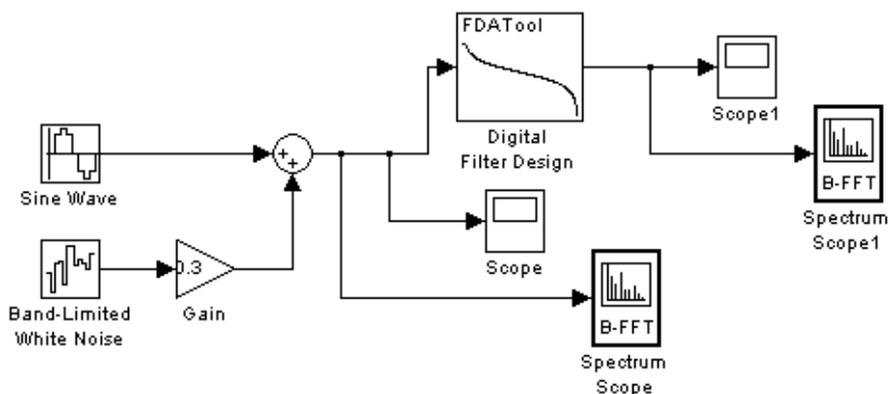


рис.1. Схема simulink для визуализации исходного сигнала и его спектра до и после фильтрации

Выводы

Пояснить неполное удаление шума линейным фильтром.

Основная часть

Лабораторная работа №4 «Амплитудная модуляция»

Цель работы:

Изучить процесс амплитудной модуляции/демодуляции сигнала.

Функции модуляции/демодуляции

Для передачи по любому каналу связи цифровое сообщение, представляющее собой последовательность символов (чисел), необходимо преобразовать в аналоговый сигнал — изменяющуюся во времени физическую величину (например, напряжение). Кроме того, канал связи способен пропускать лишь определенную полосу частот, так что сформированный аналоговый сигнал должен этой полосе соответствовать. Указанное преобразование осуществляется путем модуляции. Обратный процесс носит название демодуляции.

Сущность процесса модуляции состоит в том, что передаваемое сообщение используется для изменения каких-либо параметров несущего колебания (чаще всего — синусоидального). Это позволяет создать модулированный сигнал, занимающий заданную полосу частот. Пакет Communications содержит функции для реализации аналоговой и цифровой модуляции и демодуляции. При аналоговой модуляции входным сигналом является непрерывная функция, при цифровой — последовательность символов. Модулированный сигнал может представляться либо в вещественном виде (passband simulation), либо в виде комплексной огибающей (baseband simulation). Соответственно приведенной классификации имеется 8 функций: (в новых версиях пакета, начиная с Matlab 2008, имеется возможность использовать класс modem для построения модемов, для справки: help modem/types)

amod — аналоговая модуляция, вещественный выходной сигнал;

amodce — аналоговая модуляция, выходной сигнал в виде комплексной огибающей;

ademod — аналоговая демодуляция, вещественный входной сигнал;

ademodce — аналоговая демодуляция, входной сигнал в виде комплексной огибающей;

dmod — цифровая модуляция, вещественный выходной сигнал;

dmodce — цифровая модуляция, выходной сигнал в виде комплексной огибающей;

ddemod — цифровая демодуляция, вещественный входной сигнал;

ddemodce — цифровая демодуляция, входной сигнал в виде комплексной огибающей;

Функциями пакета поддерживаются следующие виды аналоговой модуляции:

1. амплитудная модуляция;
2. амплитудная модуляция с подавленной несущей;
3. однополосная модуляция;
4. частотная модуляция;
5. фазовая модуляция;
6. квадратурная модуляция.

Постановка задачи

Сгенерировать однотональный сигнал низкой частоты.

Выполнить амплитудную модуляцию (АМ) сигнала по закону

$$u(t) = U_m [1 + M \cdot \cos \Omega t] \cdot \cos \omega_0 t \quad \text{для различных значений глубины модуляции } (M = 0.5; 1; 1.5).$$

Получить спектр модулированного сигнала.

Выполнить модуляцию с подавлением несущей. Получить спектр.

Выполнить синхронное детектирование и получить исходный однополосный сигнал.

Рассчитать КПД модуляции.

Теоретическое обоснование

Перенос спектра сигналов из низкочастотной области в выделенную для их передачи область высоких частот выполняется операцией модуляции.

АМ соответствует переносу информации $s(t) \Rightarrow U(t)$ при постоянных значениях параметров несущей частоты ω и φ . АМ – сигнал представляет собой произведение информационной огибающей $U(t)$ и гармонического колебания ее заполнения с более высокими частотами.

Форма записи амплитудно-модулированного сигнала:

$u(t) = U_m [1 + M \cdot \cos \Omega t] \cdot \cos \omega_0 t$, где U_m – постоянная амплитуда несущего колебания

при отсутствии входного (модулирующего) сигнала $s(t)$, M – коэффициент амплитудной модуляции. Значение M характеризует глубину амплитудной модуляции. В зависимости от значения M различают нормальную модуляцию ($M < 1$), глубокую модуляцию ($M = 1$) и перемодуляцию ($M > 1$).

Получим спектр модулированного сигнала:

$u(t) = U_m \cos \omega_0 t + U_m \cdot M / 2 \cos [\omega_0 + \Omega t] + U_m \cdot M / 2 \cos [\omega_0 - \Omega t]$. Отсюда

следует, что модулирующее колебание с частотой Ω перемещается в область частоты ω_0 и расщепляется на два колебания, симметричные относительно частоты ω_0 с частотами $\omega_0 - \Omega$ и $\omega_0 + \Omega$ соответственно, что будет видно в спектре.

КПД амплитудной модуляции равен $\eta_{Ai} = \frac{M^2}{M^2 + 2}$.

Как видно, основная доля мощности АМ – сигнала приходится на несущую частоту. При балансной модуляции (с подавлением несущей) производится перемножение двух сигналов – модулирующего и несущего, при котором происходит подавление несущего колебания, соответственно, КПД модуляции становится равным 100%. Так, для

однотонального сигнала (без учета начальных фаз колебаний) при $U(t) = M \cdot \cos \Omega t$ имеем

$$u(t) = U_m \cdot M \cdot \cos \Omega t \cdot \cos \omega_0 t = \left(U_m \frac{M}{2} \right) \cos [\omega_0 + \Omega t] + \cos [\omega_0 - \Omega t]$$

Один из самых распространенных методов демодуляции – синхронное детектирование. При синхронном детектировании модулированный сигнал умножается на опорное колебание с частотой несущего колебания, т.е.

$$y(t) = u(t) \cdot \cos \omega_0 t = U(t) \cdot \cos \omega_0 t \cdot \cos \omega_0 t = 1/2 U(t) + 1/2 U(t) \cdot \cos 2\omega_0 t$$

Ход работы

1. Выполнение пп.1-3 задания в командном окне MATLAB.

Смоделируем низкочастотный гармонический сигнал ($y = \sin 2 \cdot \pi i \cdot f_0 \cdot x$, частота сигнала $f=2$ Гц). Частоту дискретизации установим равной $f_0=100$ Гц. Для получения модулированного сигнала будем использовать формулу:

$u(t) = U_m [1 + M \cdot \cos f_c t] \cdot \cos f_c t$, где $f_c=20$ Гц - частота несущего колебания.

Получим модулированный сигнал для различных значений глубины модуляции $M = 0.5; 1; 1.5$.

Построим исходный и модулированный сигнал, а также спектр модулированного сигнала

2. Выполнение п.4 задания в командном окне MATLAB.

Для выполнения модуляции с подавлением несущей воспользуемся низкочастотным сигналом из п.1 и формулой $u(t) = U_m \cdot M \cdot \cos f_0 t \cdot \cos f_c t$. Значения частот такие же, как и в п.1. Возьмем $M = 0.5$.

Построим исходный и модулированный сигнал, а также спектр модулированного сигнала

3. Выполнение п.5 задания в командном окне MATLAB.

Для выполнения синхронного детектирования воспользуемся исходным и модулированным сигналом из п.1, а также формулой $y(t) = u(t) \cdot \cos f_c t$. В качестве ФНЧ будем использовать фильтр Баттерворта (функция BUTTER).

Построим исходный сигнал, модулированный сигнал, сигнал после выполнения синхронного детектирования и его спектр

4. Выполнение п.6 задания.

Для нахождения КПД модуляции воспользуемся формулой $\eta_{Ai} = \frac{M^2}{M^2 + 2}$.

| M | η_{Ai} |
|-----|-------------|
| 0.5 | |
| 1 | |
| 1.5 | |

5. Выполнение однополосной модуляции/демодуляции сигнала в среде Simulink.

Проведем модуляцию/демодуляцию исходного низкочастотного сигнала. Для модуляции будем использовать стандартный блок SSB AM Modulator Passband, для демодуляции – SSB AM Demodulator Passband. Для синтеза ФНЧ будем использовать стандартный блок Analog Filter Design.

Построим исходный сигнал, модулированный сигнал, сигнал после демодуляции и сигнал после фильтрации.

Схема simulink для выполнения задачи изображена на рис.1.

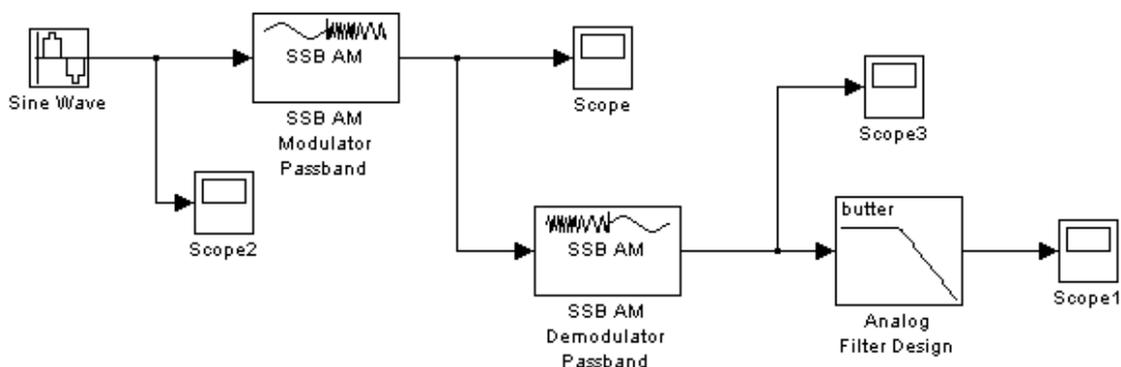


рис.1. Схема simulink для модуляции/демодуляции низкочастотного сигнала и визуализации результатов.

6. Выполнение балансной модуляции/демодуляции сигнала в среде Simulink.

Проведем модуляцию/демодуляцию исходного низкочастотного сигнала. Для модуляции будем использовать стандартный блок SSB AM Modulator Passband, для демодуляции – SSB AM Demodulator Passband. Для синтеза ФНЧ будем использовать стандартный блок Analog Filter Design.

Схема simulink для выполнения задачи изображена на рис.2.

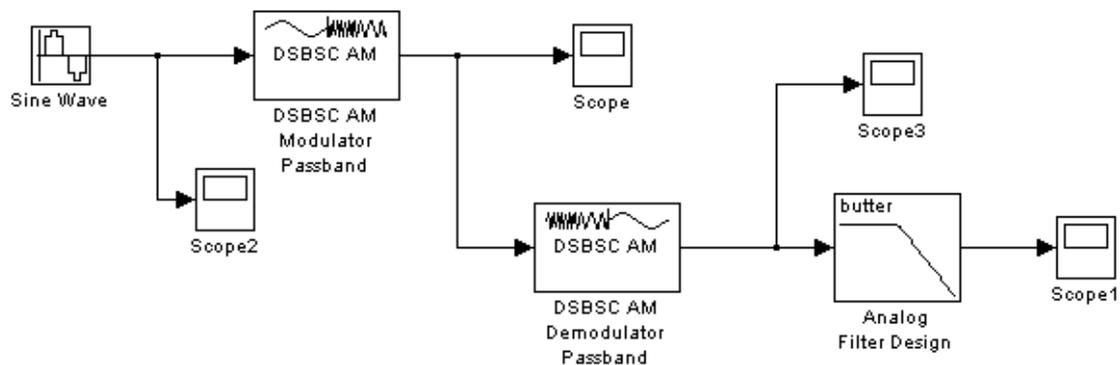


рис.2. Схема simulink для модуляции/демодуляции низкочастотного сигнала и визуализации результатов.

Выводы

Преобразование спектров при АМ. Сравнение видов АМ

Лабораторная работа №5 «Угловая модуляция»

Цель работы:

Изучение методов частотной и фазовой модуляции (ЧМ и ФМ).

Постановка задачи

Получить ЧМ – сигнал и его спектр.

Получить ФМ – сигнал и его спектр.

Провести сравнение амплитудной и угловой модуляции.

Выполнить демодуляцию с помощью схемы ФАПЧ, для чего построить схему ФАПЧ в Simulink с помощью встроенного блока PLL. Исследовать автономный режим работы (входной сигнал – постоянный).

Подать на вход схемы ФАПЧ УМ-сигнал и выполнить его демодуляцию

Теоретические сведения

При угловой модуляции в несущем гармоническом колебании $u(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi)$ значение амплитуды колебаний U_m остается постоянным, а информация $s(t)$ переносится либо на частоту ω , либо на фазовый угол φ .

Фазовая модуляция

Уравнение ФМ – сигнала определяется выражением: $u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + k \cdot s(t))$, где k – коэффициент пропорциональности. При $s(t) = 0$, ФМ – сигнал является простым гармоническим колебанием. С увеличением значений $s(t)$ полная фаза колебаний нарастает во времени быстрее и опережает линейное нарастание $\omega_0 t$. При уменьшении значений $s(t)$ скорость роста полной фазы во времени спадает. В моменты экстремальных значений $s(t)$ абсолютное значение фазового сдвига между ФМ – сигналом и значением $\omega_0 t$ немодулированного колебания также является максимальным и носит название девиации фазы (вверх $\Delta\varphi_a = k \cdot s_{\max}(t)$, или вниз $\Delta\varphi_i = k \cdot s_{\min}(t)$ с учетом знака экстремальных значений модулирующего сигнала).

Частотная модуляция

ЧМ характеризуется линейной связью модулирующего сигнала с мгновенной частотой колебаний, при которой мгновенная частота колебаний образуется сложением частоты высокочастотного несущего колебания ω_0 со значением амплитуды модулирующего сигнала с определенным коэффициентом пропорциональности: $\omega(t) = \omega_0 + k \cdot s(t)$.

$$u(t) = U_m \cos\left(\omega_0 t + k \int_0^t s(t) dt + \varphi_0\right)$$

Уравнение ЧМ – сигнала:

Аналогично ФМ, для характеристики глубины частотной модуляции используются понятия девиации частоты вверх $\Delta\omega_a = k \cdot s_{\max}(t)$, и вниз $\Delta\omega_i = k \cdot s_{\min}(t)$.

Частотная и фазовая модуляция взаимосвязаны. Если изменяется начальная фаза колебания, изменяется и мгновенная частота, и наоборот. По этой причине их и объединяют под общим названием угловой модуляции (УМ). По форме колебаний с угловой модуляцией невозможно определить, к какому виду модуляции относится данное колебание, к ФМ или ЧМ, а при достаточно гладких функциях $s(t)$ формы сигналов ФМ и ЧМ вообще практически не отличаются.

$\varphi(t) = \beta \sin \Omega t$, где β - индекс угловой модуляции (modulation index), которым задается интенсивность колебаний начальной фазы. Полная фаза модулированного сигнала с учетом несущей частоты ω_0 : $\psi(t) = \omega_0 t + \beta \sin \Omega t$.

Уравнение модулированного сигнала: $u(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \beta \sin \Omega t)$.

Мгновенная частота колебаний: $\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} = \omega_0 + \beta \Omega \cos \Omega t$.

Как следует из этих формул, и начальная фаза, и мгновенная частота изменяется по гармоническому закону. Максимальное отклонение от среднего значения ω_0 равно $\omega_d = \beta \Omega$, и получило название девиации частоты (frequency deviation). Отсюда, индекс угловой модуляции равен отношению девиации частоты к частоте модулирующего

сигнала: $\beta = \frac{\omega_d}{\Omega}$.

Различия между частотной и фазовой модуляцией проявляются при изменении частоты Ω модулирующего сигнала.

При фазовой модуляции девиация частоты прямо пропорциональна Ω , а индекс угловой модуляции от частоты модулирующего сигнала не зависит: $\beta = \text{const}, \omega_d = \beta \Omega$.

Напротив, при ЧМ постоянным параметром модуляции является девиация частоты, при этом индекс модуляции обратно пропорционален частоте модулирующего сигнала:

$\omega_d = \text{const}, \beta = \frac{\omega_d}{\Omega}$.

Спектры сигналов с угловой модуляцией.

При малых значениях индекса угловой модуляции ($\beta \ll 1$, узкополосная модуляция) имеют место приближенные равенства:

$\cos \beta \sin \Omega t \approx 1, \sin \beta \sin \Omega t \approx \beta \sin \omega_0 t$.

Тогда $u(t) \approx U_m \cos \omega_0 t + \beta U_m / 2 \cos[\omega_0 + \Omega t] + -\beta U_m / 2 \cos[\omega_0 - \Omega t]$, то есть

амплитудные спектры одностональных ФМ и ЧМ сигналов при $\beta \ll 1$ практически аналогичны АМ сигналам и также содержат верхнюю и нижнюю боковые частоты $\omega_0 + \Omega$ и $\omega_0 - \Omega$. Различие заключается только в смене знака амплитуды нижней боковой частоты на минус. Соответственно, гармонические АМ сигналы могут быть трансформированы в ЧМ сигналы изменением на 180° начальной фазы одной из боковых полос. При малых значениях индекса β основная мощность сигнала приходится на несущую частоту. С ростом индекса модуляции полоса частот, занимаемая сигналом, расширяется.

Практическая ширина спектра сигнала с угловой модуляцией определяется по формуле:

$\Pi_{\text{ФМ}} \approx 2(\beta + 1)\Omega$. Формирование реальных сигналов, как правило, выполняется при $\beta \ll 1$, при этом эффективная ширина спектра равна удвоенной девиации частоты:

$\Pi_{\text{ФМ}} \approx 2\beta\Omega = 2\omega_d$.

Схемы ФАПЧ используются в передатчиках и приемниках, при аналоговой и цифровой модуляции, а также при передаче цифровых сигналов. Схема ФАПЧ позволяет обеспечить точную настройку, частотную селекцию и фильтрацию без использования громоздких элементов фильтров, используемых в схемах детектирования. ФАПЧ представляет собой систему управления с петлей обратной связи, в которой параметрами регулирования

являются частота или фаза сигнала. Структурная схема петли ФАПЧ (рис. 1.) содержит три основных блока:
 фазовый компаратор или фазовый детектор
 петлевой фильтр (фильтр низких частот, ФНЧ)
 генератор, управляемый напряжением (ГУН)

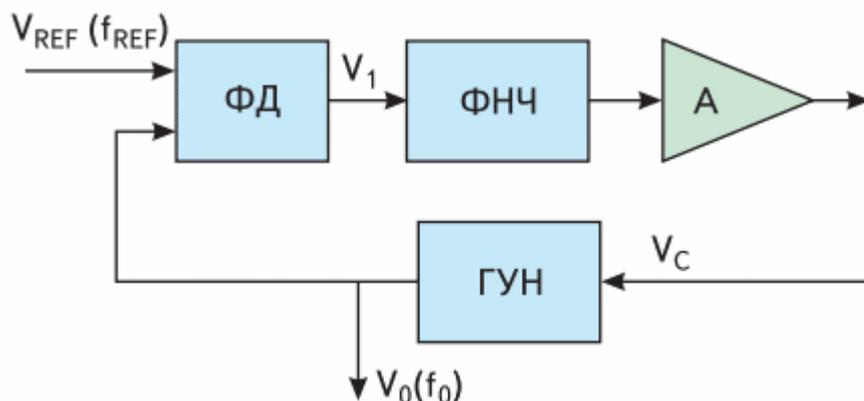


рис.1. Структурная схема петли ФАПЧ

ФД (или детектор ошибки) сравнивает фазы сигнала опорного генератора V_{REF} и выходного сигнала ГУН V_0 и вырабатывает напряжение V_1 , величина которого зависит от разности фаз этих сигналов. Если эта разность равна φ радиан, то выходное напряжение ФД будет определяться выражением (1),

$$V_1 = K_\varphi \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1)$$

где K_φ - коэффициент передачи «фаза – напряжение» ФД.

Выходное напряжение ФД пропускается через ФНЧ для подавления высокочастотных составляющих и их гармоник, которые присутствуют в опорном сигнале и на выходе ГУН. Напряжение с выхода ФНЧ усиливается и используется как управляющее для ГУН (V_C). Величина его вычисляется по ф.2,

$$V_C = K_\varphi A \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

где A - коэффициент усилителя. Такое управляющее напряжение обеспечивает изменение частоты ГУН по отношению к частоте его собственных колебаний f_0 до уровня:

$$f = f_0 + K_V V_C \quad (3)$$

где K_V - коэффициент передачи «напряжение – частота» ГУН.

Когда осуществлен захват опорного сигнала f_{REF} схемой ФАПЧ, справедливо равенство (4):

$$f = f_{REF} = f_0 + K_V V_C \quad (4)$$

Поскольку согласно (3)

$$V_C = \frac{f_{REF} - f_0}{K_V} = K_\varphi A \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right)$$

получим:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \frac{f_{REF} - f_0}{K_V K_\varphi A} \quad (5)$$

Таким образом, если схема ФАПЧ захватила опорный сигнал, то сдвиг по фазе между этим сигналом и выходным сигналом ГУН устанавливается равным φ , и две частоты f_{REF} и f_0 будут точно синхронизированы.

Максимальное напряжение на выходе ФД имеет место при $\varphi = \pi$ и $\varphi = 0$ и определяется выражением (6):

$$V_{I(MAX)} = \pm K_\varphi \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

Соответствующее максимально возможное управляющее напряжение равно:

$$V_{C(MAX)} = \pm K_V K_\varphi \frac{\pi}{2}$$

В этом случае диапазон частот, который можно обеспечить на выходе ГУН, составляет:

$$f - f_{0_MAX} = K_V V_{C(MAX)} = \pm K_V K_\varphi \frac{\pi}{2} A \quad (7)$$

Следовательно, максимальный частотный диапазон сигналов опорного генератора, при которых схема ФАПЧ будет находиться в режиме захвата, составляет:

$$f_{REF} = f_0 \pm K_V K_\varphi \frac{\pi}{2} A = f \pm f_L \quad (8)$$

Величина $2f_L$ называется полосой захвата ФАПЧ и определяется по формуле (9):

$$2f_L = K_V K_\varphi A \pi \quad (9)$$

Следует отметить, что полоса захвата симметрична по отношению к частоте собственных колебаний ГУН. Вне этой полосы частота ГУН не может быть синхронизирована с частотой опорного сигнала.

Также следует отметить, что существует область удержания — диапазон частот, в котором после того, как произошел захват частоты, система ФАПЧ будет точно отслеживать частоту внешнего опорного сигнала. Полоса удержания (синхронизации) — диапазон частот в области удержания слева или справа от опорной частоты (т. е. область удержания в 2 раза шире полосы удержания).

Время захвата ФАПЧ — это время от момента подачи сигналов на входы ФД до момента возникновения установившегося режима (момента захвата).

Ход работы

1. ЧМ в командном окне MATLAB.

Смоделируем низкочастотный гармонический сигнал ($y = \cos 2 \cdot \pi i \cdot f_0 \cdot x$, частота сигнала $f_0 = 2\tilde{A}\ddot{o}$). Частоту дискретизации установим равной $100\tilde{A}\ddot{o}$. Для получения ЧМ – сигнала будем использовать стандартную функцию FMMOD(X,Fc,Fs,FREQDEV).

Получим модулированный сигнал для различных значений индекса угловой модуляции.

Построим исходный и модулированный сигнал, а также спектр модулированного сигнала

2. ФМ в командном окне MATLAB.

Аналогично предыдущему пункту смоделируем низкочастотный гармонический сигнал ($y = \cos 2 \cdot \pi i \cdot f_0 \cdot x$, частота сигнала $f_0 = 2\tilde{A}\ddot{o}$). Частоту дискретизации установим равной 100Гц. Для получения ФМ – сигнала будем использовать стандартную функцию PMMOD(X,Fc,Fs, PHASEDEV).

Получим модулированный сигнал для различных значений девиации фазы.
 Построим исходный и модулированный сигнал, а также спектр модулированного сигнала

3. ЧМ в среде Simulink.

Проведем ЧМ – модуляцию исходного низкочастотного сигнала. Для модуляции будем использовать стандартный блок FM Modulator Passband.

Построим исходный сигнал, модулированный сигнал и спектр модулированного сигнала для различных значений индекса угловой модуляции

Схема simulink для выполнения задачи изображена на рис.1.

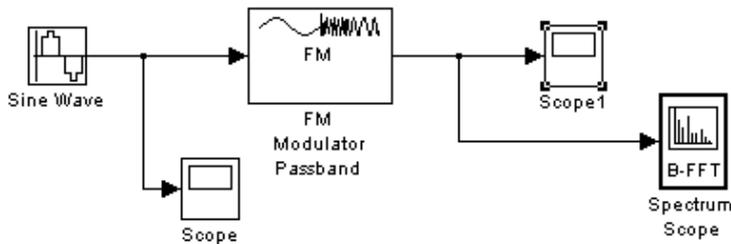


рис.1. Схема simulink для модуляции низкочастотного сигнала и визуализации результатов.

4. ФМ в среде Simulink.

Проведем ФМ – модуляцию исходного низкочастотного сигнала. Для модуляции будем использовать стандартный блок PM Modulator Passband.

Построим исходный сигнал, модулированный сигнал и спектр модулированного сигнала

Схема simulink для выполнения задачи изображена на рис.4.1.

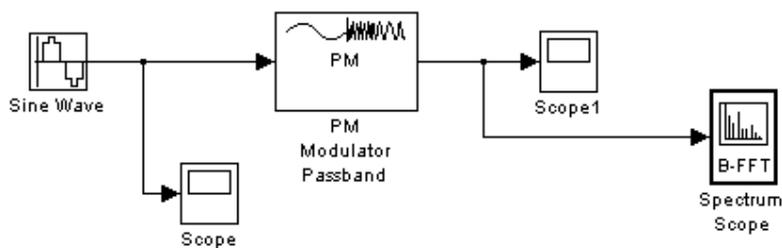


рис.2. Схема simulink для модуляции низкочастотного сигнала и визуализации результатов.

5. Работа схемы ФАПЧ в режиме слежения в среде Simulink

Смоделируем работу схемы ФАПЧ в режиме слежения в среде Simulink с помощью стандартного блока PLL.

Построим графики сигналов на выходах фазового детектора (ФД), фильтра нижних частот (ФНЧ) и генератора, управляемого напряжением (ГУН) .

Схема Simulink для выполнения задачи представлена на рис.3.

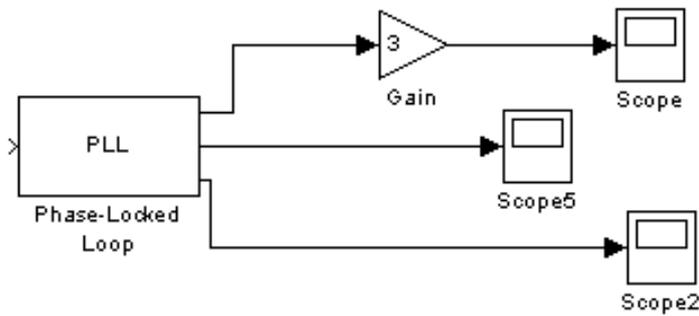


рис.3. Схема Simulink для моделирования работы ФАПЧ в режиме слежения

6. Работа схемы ФАПЧ в режиме захвата и удержания сигнала

Смоделируем работу схемы ФАПЧ в режиме слежения в среде Simulink с помощью стандартного блока PLL аналогично п.1. Для моделирования работы схемы ФАПЧ в режиме захвата и слежения подадим на вход УМ-сигнал (в данном случае ЧМ). Построим графики входного сигнала, сигналов на выходах ФД, ФНЧ и ГУН. Схема Simulink для выполнения задачи представлена на рис.4.

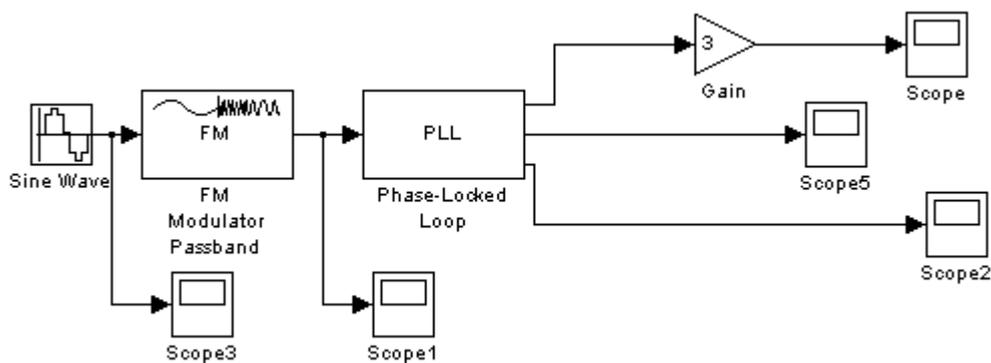


рис.4 Схема Simulink для моделирования работы ФАПЧ в режиме захвата и удержания

Выводы

Сравнение АМ и УМ. Анализ результатов демодуляции с помощью встроенного блока демодулятора и схемой ФАПЧ.

Лабораторная работа №6 «Цифровая модуляция»

Цель работы:

Изучение методов модуляции цифровых сигналов и сравнение их свойств.

При цифровой модуляции возможны следующие ее виды:

1. амплитудная манипуляция;
2. частотная манипуляция;
3. минимальная частотная манипуляция;
4. фазовая манипуляция;
5. квадратурная манипуляция.

Цифровая модуляция и демодуляция включают в себя две стадии. При модуляции цифровое сообщение сначала преобразуется в аналоговый модулирующий сигнал с помощью функции `modmap`, а затем осуществляется аналоговая модуляция. При демодуляции сначала получается аналоговый демодулированный сигнал, а затем он преобразуется в цифровое сообщение с помощью функции `demodmap`.

Наконец, три последних функции этой группы предназначены для работы с конкретными сигнальными созвездиями квадратурной манипуляции. Функции `qaskenco` и `qaskdeco` производят кодирование и декодирование сообщения с использованием “квадратного” созвездия, а функция `arkconst` позволяет вывести на экран изображение “концентрического” созвездия.

Функция `ganderr` предназначена для формирования ошибок в цифровом сигнале. Она дает матрицу, в каждой строке которой имеется заданное число случайно расположенных ненулевых элементов.

Для оценки помехоустойчивости системы связи необходимо произвести сравнение исходного (передаваемого) сообщения с сообщением, полученным в результате приема, и определить число ошибок, возникших в процессе передачи, а также вероятность ошибки. Эти действия выполняются функциями `sumerr` и `biterr`, первая из которых подсчитывает число несовпадающих символов в двух сообщениях, а вторая — число несовпадающих битов в двоичных представлениях этих символов. Кроме числа ошибок, обе функции могут возвращать долю ошибок в общем числе символов (битов) и индикаторы мест возникновения ошибок.

Последние две функции данной группы предназначены для графического отображения сигналов с квадратурной манипуляцией. Функция `eyediagram` выводит так называемую глазковую диаграмму, а функция `scatterplot` — диаграмму рассеяния.

Постановка задачи

Получить сигналы BPSK, PSK, OQPSK, genQAM, MSK, M-FSK модуляторов

Построить их сигнальные созвездия.

Провести сравнение изученных методов модуляции цифровых сигналов.

Ход работы

В качестве примера кода используйте файл `lab6.m`

В Simulink воспользуйтесь библиотекой Digital Baseband/Passband Modulation

Выводы

Соотношение между числом уровней модуляции и скоростью передачи данных, а также помехоустойчивостью технологии связи.

Лабораторная работа №7 «Помехоустойчивое кодирование»

Цель работы: работы

Изучение методов помехоустойчивого кодирования и сравнение их свойств.

Моделирование каналов связи

Сформированный в результате модуляции сигнал поступает в канал связи, где он подвергается воздействию шумов и помех. Поэтому функции моделирования каналов связи должны обеспечивать внесение в сигнал искажений согласно используемым статистическим моделям. Данная группа функций пакета Communications в данный момент представлена лишь одной функцией `awgn`, которая позволяет добавить к сигналу аддитивный белый нормальный шум, реализовав при этом заданное отношение сигнал/шум. При этом мощность сигнала, зная которую необходимо для расчета требуемого уровня шума, может задаваться в явном виде либо измеряться автоматически.

Функции высокого уровня `encode` и `decode` осуществляют, соответственно, кодирование и декодирование сообщения с использованием блочного кода. Тип используемого кода задается в числе параметров функций.

Линейный блочный код в общем случае описывается порождающей матрицей (`generator matrix`). Кодирование блока (вектора) производится путем его умножения на порождающую матрицу. Помимо порождающей, существует проверочная матрица кода (`parity-check matrix`). Она может использоваться для обнаружения ошибок — при отсутствии ошибок умножение закодированного блока на проверочную матрицу должно давать нулевой вектор. Преобразование порождающей матрицы в проверочную и обратно осуществляется функцией `gen2par`.

Если умножение закодированного блока на проверочную матрицу не дает нулевого вектора, то полученный результат (его называют синдромом — `syndrome`) позволяет определить, какие именно символы были искажены в процессе передачи. Если код является двоичным (то есть символы могут принимать только значения 0 и 1), это позволяет исправить ошибки. Декодирование линейного блочного кода, таким образом, можно осуществить с помощью таблицы, в которой для каждого значения синдрома указан соответствующий вектор ошибок. Создать такую таблицу на основании проверочной матрицы кода позволяет функция `syndtable`.

Функция `gfweight` позволяет определить кодовое расстояние для линейного блочного кода по его порождающей или проверочной матрице.

Циклические

коды

Циклические коды — это подкласс линейных кодов, обладающие тем свойством, что циклическая перестановка символов в закодированном блоке дает другой возможный закодированный блок того же кода.

Для работы с циклическими кодами в пакете Communications имеются две функции. Задав число символов в кодируемом и закодированном блоках, с помощью функции `cyclpoly` можно получить порождающий полином циклического кода. Далее, используя этот полином в качестве одного из параметров функции `cyclgen`, можно получить порождающую и проверочную матрицы для данного кода.

Коды БЧХ

Коды БЧХ являются одним из подклассов циклических блочных кодов. Для работы с ними функции высокого уровня вызывают специализированные функции `bchenco` (кодирование) и `bchdeco` (декодирование). Кроме того, функция `bchpoly` позволяет рассчитывать параметры или порождающий полином для двоичных кодов БЧХ.

Коды Хэмминга

Коды Хэмминга являются одним из подклассов циклических блочных кодов. Порождающий полином для кодов Хэмминга неприводим и примитивен, а длина

кодированного блока равна $2^m - 1$. Порождающая и проверочная матрицы для кодов Хэмминга генерируются функцией `hammgen`.

Коды Рида—Соломона

Коды Рида—Соломона являются одним из подклассов циклических блочных кодов. Это единственные поддерживаемые пакетом Communications коды, которые работают не с однокбитовыми, а с многобитовыми символами. Для работы с кодами Рида—Соломона функции высокого уровня вызывают специализированные функции `rsenco` (кодирование) и `rsdeco` (декодирование). Кроме того, функции `rsencode` и `rsdecode` позволяют использовать при кодировании и декодировании экспоненциальный формат данных, а функции `rsencof` и `rsdecof` осуществляют кодирование и декодирование текстового файла. Наконец, функция `rspoly` генерирует порождающие полиномы для кодов Рида—Соломона.

Постановка задачи

Провести кодирование сигнала, полученного с помощью функции `randerr` кодом Хэмминга 2-мя способами: с помощью встроенных функций `encode/decode`, а также через создание проверочной и генераторной матриц и вычисление синдрома. Оценить корректирующую способность кода.

С помощью встроенных функций `encode/decode` выполнить кодирование циклическим кодом. Оценить корректирующую способность кода.

Работа выполняется только в среде Matlab

Выводы: Оценка корректирующей способности кодов..